

論文 コンクリート舗装のポリッシング摩耗の簡易評価に関する検討

田中 裕隆*1・吉武 勇*2・大西 隆太郎*3・大和 功一郎*4

要旨：近年のコンクリート舗装の損傷例として、ポリッシング摩耗が考えられるが、コンクリート材料や配合による影響因子が多いにも拘わらず、統一的な試験はなく、現場でも簡易的に評価できる試験方法が望まれる。本研究では、研磨機を用いてコンクリート舗装のポリッシング面を簡易的に作製し、コンクリートのポリッシング摩耗を評価する方法について検討した。その結果、ゴム製の小型研磨機によりポリッシング摩耗面が作製でき、ポリッシング摩耗の指標となる算術平均高さ Sa と摩耗深さには相関があることがわかった。

キーワード：コンクリート舗装、ポリッシング、マイクロテクスチャ、算術平均高さ Sa

1. はじめに

セメント・コンクリート舗装は瀝青系舗装に比べて長期耐久性に優れるものの、その長い供用過程において舗装表面の摩耗損傷が生じ、すべり抵抗が低下する。近年、舗装における代表的な摩耗現象である「ラベリング」はスパイクタイヤの禁止等から生じにくくなっているが、その代わりに「ポリッシング」と呼ばれるすり磨き作用（タイヤと路面の間に細かい砂などのポリッシング材の介在で生ずる摩耗現象）がみられるようになってきた。ポリッシングにより、すべり抵抗性の低下が生じるばかりでなく、鏡面のように舗装表面の光の反射が大きくなり、視認性が低下する問題も指摘されている。現在、一般的なコンクリートの摩耗試験としては、チェーン式回転ラベリング試験が挙げられ、これによりすりへり抵抗性を調べるとともに、スキッドレジスタンステストや DF テスタ²⁾によってすべり抵抗性の評価が行われている。しかしながら、この試験では、ポリッシング現象を再現することは困難であり、既設・新設のコンクリート舗装を問わず今後増加すると考えられるポリッシング摩耗に評価できる手法が望まれる。ポリッシング摩耗抵抗性を現場でも簡易的に評価できることは、点検・管理の効率化の観点からも重要である。そのためには、短時間で摩耗面を再現し、ポリッシング摩耗抵抗性を推定する指標が必要となる。ポリッシングはコンクリート表面近傍の研磨抵抗性に起因するものであり、施工・供用環境等の条件によっても異なるが、コンクリート材料・配合に起因するところが大きい。これまでに行われている摩耗やすべり抵抗性に関する研究³⁾⁵⁾は粗骨材特性に着目したものが多く、コンクリート舗装は瀝青系の舗装に比べ、表層近傍では粗骨材よりも細骨材の方

が露出割合は大きくなる。そのため、期待される試験方法は粗骨材だけでなく細骨材の影響も評価できる必要がある。そこで、本研究ではポリッシング摩耗特性の評価指標を検討するため、ポリッシングに近いすり磨きを施せる小型研磨機を用いた。そして細骨材・粗骨材・水結合材比・混和材を変えた9種類のコンクリート配合および細骨材を変えた2種類のモルタルに対してポリッシング摩耗実験を行い、形成されたマイクロテクスチャとコンクリートの特性についての関係性を調査した。

2. 実験方法

2.1 目的と手法

本研究の目的はコンクリート舗装のポリッシング摩耗特性の簡易評価のための検討を行うことである。そこで、コンクリート舗装のポリッシング摩耗抵抗性を調べるため、簡易的な方法で摩耗面を作製し、その評価指標について検討した。特に本研究では、ポリッシング摩耗特性として、すべり摩擦係数や路面の光沢と密接な関係があるテクスチャに着目した。なお、PIARCによると凹凸が0.5~50mmのものをマクロテクスチャ、0.5mm未満のものをマイクロテクスチャと定義されている⁶⁾。ポリッシングによるコンクリート表面の平滑化が、すべり抵抗の減少や光沢の原因となるため、マイクロテクスチャが評価に適した指標と考えられる。そこでポリッシング摩耗したコンクリート表面のマイクロテクスチャと各試験値の関連性について調べた。

2.2 使用材料と配合

本研究では基礎的特性を把握するため、コンクリートの材料や配合によるポリッシング摩耗特性への影響を調べた。本実験で使用したコンクリート配合と材料

*1 山口大学大学院 創成科学研究科 建設環境系専攻 (学生会員)

*2 山口大学大学院 創成科学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 山口大学 工学部 社会建設工学科

*4 宇部興産(株) 技術開発研究所 博(工) (正会員)

表-1 コンクリート配合

No.	名称 ^{※1}	W/B ^{※2} (%)	FA/B ^{※2} (%)	単位量(kg/m ³)									s/a (%)
				W	C	FA	S ₁	S ₂	G ₁	G ₂	WRA	SP	
1	S ₁ -G ₂ -40	40	-	135	338	-	-	738	-	1168	0.02	2.20	39.8
2	S ₁ -G ₁ -45	45	-	135	300	-	756	-	1187	-	0.05	1.95	39.8
3	S ₁ -G ₁ -40	40	-	135	338	-	744	-	1168	-	0.02	2.20	39.8
4	S ₁ -G ₁ -35	35	-	135	386	-	728	-	1143	-	0.07	6.18	39.8
5	S ₂ -G ₂ -45	45	-	135	344	-	244	244	-	590	0.01	3.86	39.8
6	S ₂ -G ₂ -40	40	-	135	338	-	-	738	-	1168	0.05	4.39	39.8
7	S ₂ -G ₂ -35	35	-	135	386	-	-	722	-	1143	0.05	5.79	39.8
8	S ₁ -G ₁ -40-FA20	40	20	135	270	68	734	-	1153	-	0.08	2.20	39.8
9	S ₁ -G ₁ -40-FA40	40	40	135	202	136	725	-	1138	-	0.77	2.20	39.8
10	S ₁ -40	40	-	135	338	-	744	-	-	-	0.02	2.20	-
11	S ₂ -40	40	-	135	338	-	-	738	-	-	0.02	2.20	-

※1：細骨材-粗骨材-W/B ※2：B= C+FA

表-2 使用材料

材料の種類	記号	材料特性
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
細骨材	S ₁	石灰砕砂 表乾密度：2.62g/cm ³
	S ₂	北九州産 海砂 表乾密度：2.60g/cm ³
粗骨材	G ₁	石灰砕石 2005 表乾密度：2.72 g/cm ³
	G ₂	硬質砂岩砕石 2005 表乾密度：2.72g/cm ³
混和材	FA	JIS A 6201 規定 フライアッシュ II 種 密度：2.22g/cm ³
混和剤	WRA	高級脂肪酸系空気連行剤
	SP	ポリカルボン酸系 高性能 AE 減水剤

間走行させるなどの方法⁸⁾が提案されているが、いずれも研磨に長時間を要し、短時間でできる試験方法はみられない。そこで、ポリッシング摩耗面を簡易的に形成するため、本実験では図-1 に示すような小型研磨機を用いた。本試験装置は回転部がゴム製となっており、タイヤが地面に接地する際の追従性を模擬した、凝着せん断による摩耗が可能であり、研磨布をポリッシング材とすることで一定の摩耗面を形成できるものと考えられる。なお研磨布には 0.15mm の研磨材を用いた 80 番手を使用し、配合毎に研磨布を交換した。供



回転数：7000[r/min]
研磨材：ジルコニア
番手：80
ベルトサイズ：
60×260mm
ローラーサイズ：
50φ×60mm

図-1 小型研磨機

特性をそれぞれ表-1、表-2 に示す。水結合材比 (W/B) を 35%、40%、45% の 3 水準とし、粗骨材には石灰砕石および硬質砂岩砕石、細骨材には石灰砕砂および海砂を用いた。またフライアッシュ (FA) をセメント質量に対する置換率 20% および 40% で混和したコンクリートを作製した。また、ポリッシング摩耗試験における粗骨材の影響を排除するため、海砂と石灰砕砂をそれぞれ用いた 2 種類のモルタルも作製した。

2.3 ポリッシング摩耗面の簡易形成方法

摩耗面の形成方法としてポリッシング材を一定量供給しながら研磨する方法⁷⁾やノーマルタイヤで一定時



図-2 ボールベアリング式 (BB) 摩耗試験機

試体の寸法は50×150×400mmであり、この側面にあたる150×400mmの側面を評価対象面とした。また本研究の摩耗試験は全て材齢91日以降において行った。

予備試験により1～6分間で摩耗試験を行い、3分以降で摩耗深さが比較的安定したため、3分間を標準の摩耗時間とした。なお研磨機の上載荷重は2kgとした。また比較のため、図-2に示すような既往のボールベアリング式摩耗試験（以下BB摩耗試験）も実施し、形成面および摩耗深さにおいて比較を行った。このBB摩耗試験は、径18mmの鋼球5個を底面の環状の溝に配置した回転球筒を介して一定荷重をかけながら、回転する台上に固定されたコンクリート板（60×150×150mm）を摩耗するものである。なお、本研究では載荷重30kg、摩耗時間を6分とし、いずれの試験も乾燥状態で行った。

2.4 摩耗深さの測定方法

摩耗深さの測定には図-3に示すようなスライダ付きのダイヤルゲージ型変位計を用いて測定を行った。測定方法の概略図を図-4に示す。小型摩耗試験によって形成される摩耗面は幅60mmであるが、端の部分の5mmずつを除いた50mmを測定区間とし、5mm間隔で11点計測を行い、研磨前後のコンクリート高さの変化の平均値を各摩耗面の摩耗深さとした。摩耗深さは各配合につき8箇所測定を行い、その平均値を平均

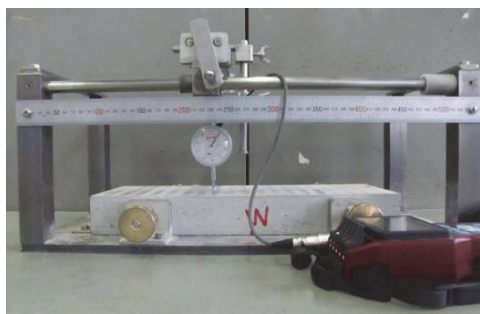


図-3 スライダー付き変位計

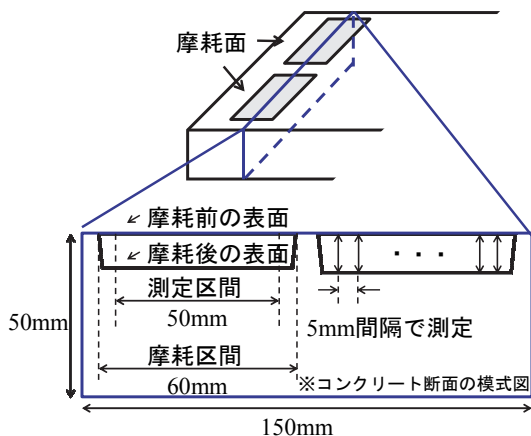


図-4 測定方法の概略図(小型)

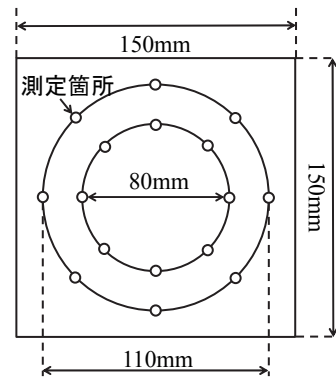


図-5 BB摩耗試験における摩耗の測定箇所

摩耗深さとした。

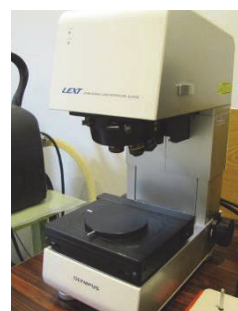
BB摩耗試験では摩損質量で一般に評価されるが、本研究では、比較のため平均摩耗深さを同様の変位計を用いて測定した。BB摩耗試験の測定方法を図-5に示す。直径80mmの内円と直径110mmの外円をそれぞれ8等分する点において摩耗前後の表面高さの変化を摩耗深さとし、その平均から平均摩耗深さを求めた。

2.5 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度をJIS A 1108に準拠し求めた。本研究の試験対象には、フライアッシュコンクリートも含まれるため、試験材齢を91日とした。

2.6 マイクロテクスチャの測定方法

本研究のような小型の摩耗試験では、すべり抵抗値British Pendulum Number (BPN) を定める振り子式スキッドレジスタンステストを用いることができない。既往の研究によると、舗装面のすべり抵抗値BPNをマイクロテクスチャによって間接的に評価できるため⁹⁾、



ライト：落射用白色LED照明
照射方向：鉛直下向き
総合倍率：
×108～×17280
観察視野：
2560×2560～16×16
[10⁻⁶・m]
レーザー：
405nm半導体レーザー

図-6 走査型レーザー電子顕微鏡

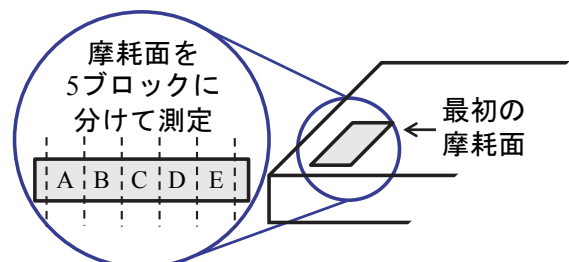


図-7 測定方法の詳細図(顕微鏡)

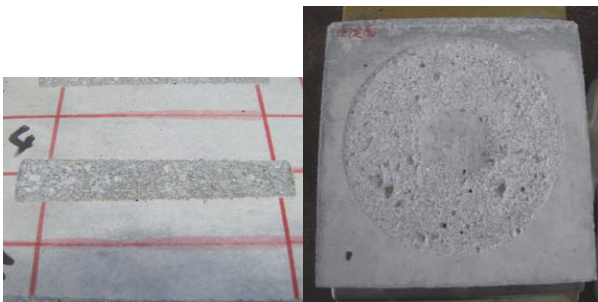
本研究では図-6 に示す走査型レーザー電子顕微鏡を用いて得られた面の算術平均高さをマイクロテクチャとして評価することとした。測定方法の詳細図を図-7 に示す。測定は摩耗面を5つに分け、それぞれの測定範囲を $2560 \times 2560 [10^{-6} \cdot m]$ とした。

3. 実験結果および考察

3.1 ポリッシング摩耗試験の比較

No.1~No.7 のコンクリートについて、既往の BB 摩耗試験および小型摩耗試験を行うことで、ポリッシング摩耗の形成状況を調べた。各摩耗面の比較例を図-8 に示す。両摩耗面において、表面近傍のペーストの摩耗損傷がみられ、比較的大きな粗骨材の剥離・飛散はみられなかった。しかしながら、BB 摩耗試験による摩耗面には細骨材や比較的小さい粗骨材の剥離に起因したくぼみ（凹部）が発生した。これは、摩耗作用によってコンクリート表面近傍にあるこれらの骨材が露出し、回転にともなって剛性の高い鋼球が剥離させたものと考えられる。このように目視できるほど大きい剥離以外にも、コンクリート表面には凹凸が多くみられ、光沢はみられなかった。一方、小型摩耗試験による摩耗面には目視で観察できるほどの局所的な凹部はなく、コンクリート材料・配合によらず平滑な摩耗面が形成できた。

ここで、両試験による平均摩耗深さの関係を図-9



a) 小型摩耗試験の摩耗面 b) BB 摩耗試験の摩耗面

図-8 摩耗面の比較例（コンクリート No.3）

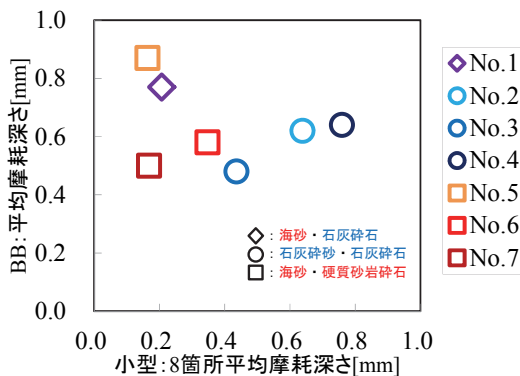
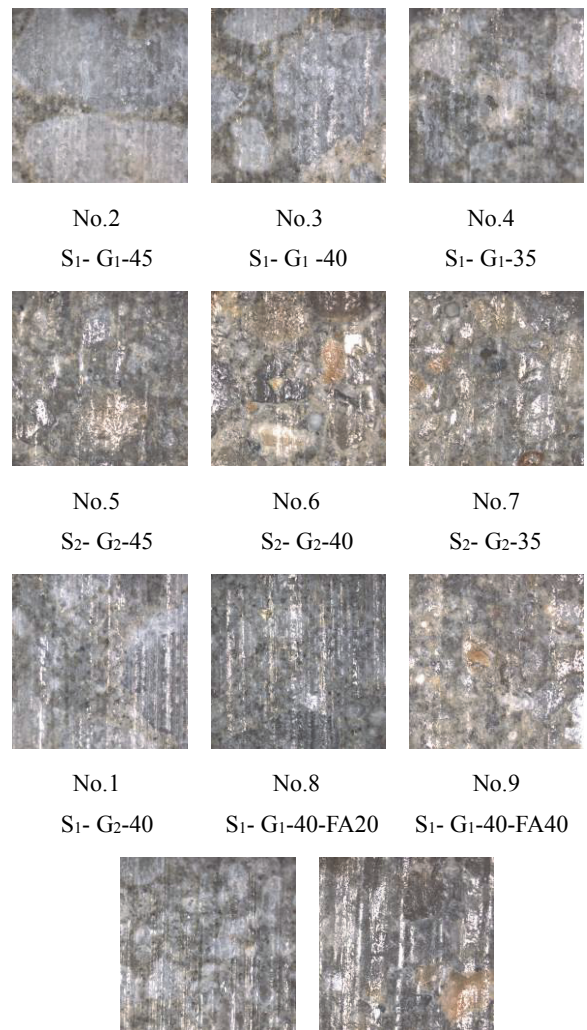


図-9 小型および BB 摩耗試験による摩耗深さの比較

に示す。BB 摩耗試験では No.1 と No.5 が大きな値となり、それ以外は同程度の値を示した。これは、海砂を使用した配合のコンクリートは、石灰砕砂を使用したコンクリートに比べ、骨材自身は削れにくいものの摩耗面に凸部分が残るため、骨材の剥離が生じやすいことが一因として挙げられる。海砂を使用した配合の中では、No.5 は水結合材比が小さく、細骨材とペースト界面の強度が低いと推定されるため、比較的小さい骨材の飛散によるくぼみ（凹部）が多く発生しやすいことが原因である。また No.1 には石灰砕石を粗骨材として使用したことから、他の海砂を使用した配合のコンクリートに比べて全体的に摩耗深さが大きくなった。小型摩耗試験では、海砂を使用したコンクリートの平均摩耗深さが小さく（すなわち摩耗抵抗性が高く）、石灰砕砂を使用したコンクリートの摩耗抵抗性が比較的小さい結果が得られた。

BB 摩耗試験と小型摩耗試験では異なる摩耗機構がそれぞれ支配的であり、後者の方がポリッシング摩耗



No.2 No.3 No.4
S1- G1-45 S1- G1-40 S1- G1-35

No.5 No.6 No.7
S2- G2-45 S2- G2-40 S2- G2-35

No.1 No.8 No.9
S1- G2-40 S1- G1-40-FA20 S1- G1-40-FA40

No.10 No.11
S1-40 S2-40

図-10 摩耗面の拡大図（C 面）

の形成には適していると判断された。そこで以降の検討では、小型摩耗試験でポリッシング摩耗面を形成し、その摩耗面について走査型顕微鏡を用いてマイクロテクスチャの解析を行うこととした。

3.2 算術平均高さ Sa

走査型顕微鏡で観察したコンクリート・モルタルの摩耗面(拡大図)を図-10に示す。なお、これらの摩耗面は図-7で示したCにあたり、各配合において未使用の研磨布を用いて研磨したものである。全体的な傾向として、石灰砕砂よりも海砂を使用しているコンクリートの方が顕微鏡の光を反射しており、表面が滑らかとなっていた。また、細骨材の種類によって凹凸状態が異なり、石灰砕砂を使用したものは研磨材による縦方向の溝が生じたが、海砂を使用したものでは骨材とペースト部分の段差によるランダムな凹凸が形成された。

この凹凸を定量的に比較・評価するため、図-11に示す算術平均高さ (Sa) を求めた。算術平均高さ (Sa) は、表面の平均高さに対する各測定点の高さの絶対差の平均値であり、値が大きいくほど凹凸が大きい粗面となる指標である。この結果より、本研究の範囲内で水結合材比 (W/B) が45%と最も高く、石灰砕砂を使用したNo.2が最も高い値を示し、水結合材比 (W/B) が35%と最も低く、海砂を使用したNo.7が最も低い値となった。また、粗骨材の影響を排除したNo.10, No.11はそれぞれNo.4, No.6と同程度の値を示している。このことから、マイクロテクスチャの形成には石灰砕砂と海砂の摩損特性の相違と細骨材界面にあるペーストの強度が強く関与しているものと推察される。

3.3 摩耗深さと算術平均高さ Sa

走査型顕微鏡を用いて算出した Sa とその面における摩耗深さの関係を図-12に示す。この結果は、比較的摩耗に弱い石灰砕砂を細骨材として使用する場合、摩耗深さが大きくなるほど摩耗面における細骨材の露出部分が増え、研磨材により形成される溝が増加したため双方の値が大きくなっていることを示す。一方、比較的摩耗に強い海砂を細骨材として使用する場合、摩耗面のうち、細骨材露出部分にほとんど溝が生じず、結果的に小さな値を示した。また、No.1とNo.3・No.6との比較により粗骨材の影響は小さく、No.6とNo.11およびNo.3とNo.10の比較により、モルタルであってもコンクリートと同程度の値を示していることから、細骨材は摩耗深さと Sa に影響することが推察された。

3.4 摩耗深さと圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は摩耗抵抗性に関与することが知られており、既往の研究でもしばしばその関係性が論じられている¹⁰⁾。しかしながらその多くの研究

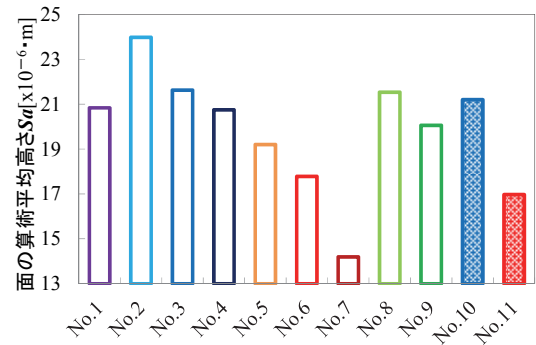


図-11 面の算術平均高さ Sa

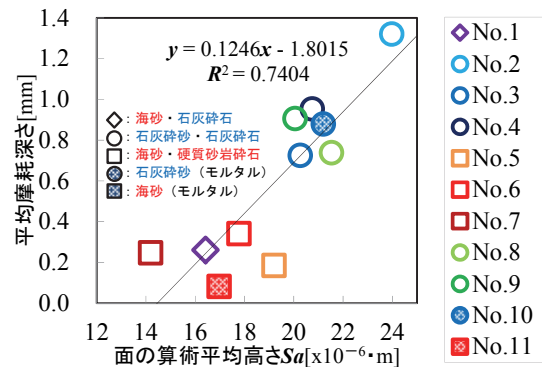


図-12 平均摩耗深さと面の算術平均高さ Sa

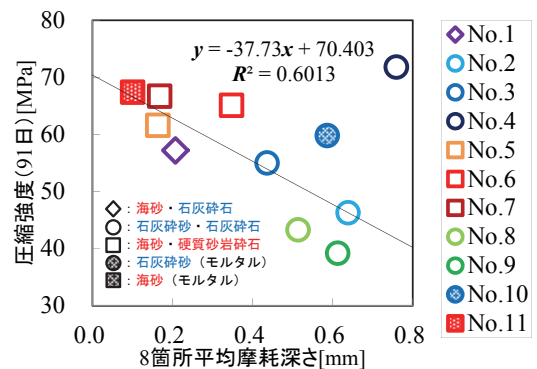


図-13 平均摩耗深さと圧縮強度

はラベリング等の摩耗損傷が大きいものであり、本研究の対象とするポリッシング摩耗については、圧縮強度との相関性が明瞭ではないと考えられる。そこで本研究では、ポリッシング摩耗と圧縮強度の相関性について調べた。

ポリッシング摩耗による平均摩耗深さと圧縮強度の関係を図-13に示す。一部例外はみられるが、既往の研究同様に、平均摩耗深さと圧縮強度に概ね負の相関性がみられた。この傾向から大きく異なるNo.4は、石灰砕砂を使用した中で最も水結合材比 (W/B) が低いものであった。この一因として、ペーストと骨材の摩耗抵抗性の差異が比較的小さく、全体的に摩耗面が形

成されたことで、摩耗深さが大きくなったことが考えられる。これはペーストの強度が摩耗深さに対して必ずしも支配的要因にはならないことを示唆している。

3.5 圧縮強度と算術平均高さ Sa

圧縮強度と Sa の関係を図-14 に示す。全体的には圧縮強度が高いほど Sa が小さい傾向がみられるが、FA を混和した配合では、他とは異なる傾向もあった。その要因として、ペースト部の摩耗特性に比べ、細骨材部の摩耗特性が Sa においては支配的であることから、圧縮強度の影響が小さかったものと考えられる。また、FA 量が 20% の No.8 と同 40% の No.9 に着目すると、高置換のものほど圧縮強度が低下し、 Sa も小さくなっている。FA はコンクリートを緻密化し、セメントの代替材として使用しても強度・(ラベリング試験による) 摩耗抵抗性は同程度になることが報告されている¹¹⁾。このことから、表面の凹凸の形成でもペースト部分が密なものほど滑らかになることが推察される。本研究の範囲内では、材料の異なるコンクリートのポリッシング摩耗特性と圧縮強度には明確な相関が認められなかった。

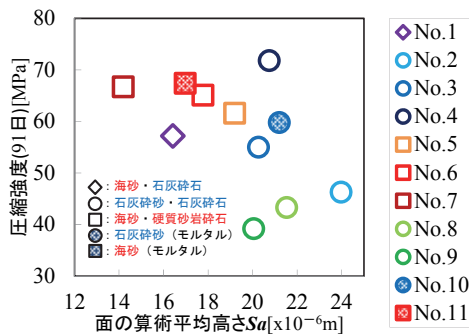


図-14 圧縮強度と面の算術平均高さ Sa

4. まとめ

本研究では、ポリッシング摩耗特性を簡易的に評価するため、ポリッシング摩耗面を形成する試験を行い、マイクロテクスチャの指標として算術平均高さ Sa を用いた各種コンクリート特性との関連性の検討を行った。本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) 本研究で使用したようなゴム製の回転部を有する小型研磨機の方が、従来の摩耗試験機に比べて、コンクリート舗装のポリッシングを模擬した摩耗面の形成に適している。
- (2) ポリッシングによる摩耗深さと算術平均高さ Sa には細骨材の種類によらず正の相関性がみられた。
- (3) 圧縮強度が高いほど平均摩耗深さと算術平均高さ Sa は小さくなる傾向を示したが、使用材料・配合による明確な相関性はみられなかった。

参考文献

- 1) 土木学会 舗装工学委員会:路面テクスチャとすべり, 土木学会, pp.82-84, 2013
- 2) 中村和博, 松本大二郎, 佐藤正和, 神谷恵三: コンクリート舗装のすべり抵抗回復工法に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.70, No.3, pp.I_197-I_204, 2014
- 3) 瀧波勇人, 小梁川雅, 森濱和正, 常松直志, 石田征男: 各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの強度特性及び耐摩耗性に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.70, No.3, pp.I_107-I_113, 2014
- 4) Gökalp İ., EmreUz V. and Saltan M. : Testing the Abrasion Resistance of Aggregates Including By-products by Using Micro Deval Apparatus with Different Standard Test Methods, Construction and Building Materials, Vol.123, pp.1-7, 2016
- 5) Ortiz E. and Mahmoud E. : Experimental Procedure for Evaluation of Coarse Aggregate Polishing Resistance, Transportation Geotechnics, Vol.1, Issue 3, pp.106-118, 2014
- 6) PIARC : Optimization of Surface Characteristics, PIARC Technical Committed on Surface Characteristics, Repot to VXIIIth World Road Congress, Brussels, Belgium, 1987
- 7) 加来照俊: 瀝青舗装表層用粗骨材のポリッシングに関する二, 三の実験, 土木学会論文報告集, Vol.200, pp.103-110, 1972
- 8) 高橋英孝, 岸良 竜, 石田征男, 梶尾 聡: コンクリート舗装のすべり抵抗性に及ぼす配合条件の影響およびすべり抵抗性回復技術の検討, 第 70 回セメント技術大会講演要旨, pp.196-197, 2016
- 9) Forster, S. W. : Pavement Microtexture and Its Relation to Skid Resistance, Transportation Research Board, Issue 1215, pp.151-164, 1989
- 10) Atis, C. D. : High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.14, No.3, pp.274-277, 2002
- 11) Yoshitake I., Ueno S., Ushio Y., Arano H. and Fukumoto S. : Abrasion and Skid Resistance of Recyclable Fly Ash Concrete Pavement Made with Limestone Aggregate, Construction and Building Materials, Vol.112, pp.440-446, 2016